

# Diseño de Filtros Armónicos para una Red de Potencia de la Provincia de Chaco

**Resumen:** Los avances tecnológicos en los últimos tiempos han dado origen a nuevos dispositivos eléctricos y electrónicos potenciando la calidad de vida de las personas. La contracara a ello, son los efectos indeseados que han originado estos dispositivos en las redes eléctricas. Uno de los efectos más evidentes es la distorsión de la forma de onda de tensión por la producción de armónicas. Algunos de los efectos producidos son aumentos de pérdidas Joule, efecto pelicular, pérdidas magnéticas adicionales, interferencias, resonancia, etc. Por lo tanto en este trabajo mediante un software específico de sistemas eléctricos de potencia, se estudia una red de la provincia de Chaco suponiendo una carga armónica genérica. Detectados los problemas causados por la misma, se diseñan filtros armónicos con circuitos RLC que aseguren el normal funcionamiento dentro de lo establecido por las reglamentaciones vigentes en cuanto a calidad de potencia y producto técnico.

**Palabras Claves:** Compensación reactiva; Armónicos; Resonancia; Calidad de potencia.

**Abstract:** Technological advances in recent times have given rise to new electrical and electronic devices enhancing people quality of life. Opposite to this, the undesirable effects which have been originated by those devices in the electrical networks. One of the evident effect is the distortion of the voltage waveform by the production of harmonics. Some of the other effects produced are Joule loss increases, film effect, additional magnetic losses, interference, resonance, etc. Through a specific software of electric power systems, a network of the province of Chaco is studied in this work, assuming a generic harmonic load. Once the problems caused by the same is detected, harmonic filters are designed with RLC circuits that ensure the normal operation within the established by the current regulations in terms of power quality and technical product.

**Keywords:** Reactive compensation; Harmonics; Resonance; Power quality.

**Yair F. Rochetta, Leonel Ávalos, Julián A. De Larrechea**

Grupo de Investigación en Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Lavaise 610, Santa Fe, Facultad Regional Santa Fe, UTN

Mail: [yair.rochetta@hotmail.com](mailto:yair.rochetta@hotmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Con el advenimiento de las últimas tecnologías en la electrónica actual, han surgido fenómenos en la red de suministro eléctrico. Uno de los más preocupantes en la actualidad es el ocasionado por la presencia de cargas armónicas. Estas cargas no lineales contaminan el sistema de distribución de energía eléctrica mediante la inyección de armónicos de corriente en la red (Anwar, S., et al, 2015).

Este fenómeno provoca efectos no deseados en la red pudiendo llegar a ocasionar daños permanentes. Entre los más perjudiciales se encuentran el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (Lemieux, G., 1990 y Currence, E. J., et al, 1995). En lo que respecta al presente estudio, como la red de potencia estudiada ha sido diseñada para operar con compensación reactiva por capacitores, es de interés el efecto de resonancia que pudiera ser ocasionado ante su conexión. El uso indiscriminado de capacitores junto con la presencia de corrientes con componentes de origen armónico trae aparejado posibles efectos de resonancia. Cada vez que un condensador en paralelo se añade o cambia de tamaño, los operadores y planificadores de la red de potencia deberían evaluar si este cambio de reactancia capacitiva puede promover condiciones de resonancia con la red (Huang, Z., et al, 2003).

En este contexto, a partir del subsistema “Chaco” obtenido en estudios anteriores de compensación reactiva mediante capacitores “shunt”, se analiza su impacto ante la presencia de polución armónica (frecuencias espurias). En este sentido se realiza un análisis de sensibilidad verificando que no se produzcan fenómenos de resonancia paralela para los distintos estados de carga, como también anali-

zando el comportamiento ante la presencia o no de la compensación reactiva ya que estos son los principales elementos que afectan la característica de respuesta de frecuencia del sistema. La conexión de capacitores puede magnificar el nivel de armónicos, causando posiblemente resonancias paralelas y/o series en el sistema (Czarnecki, L. S. y Gin, H. 2000).

Por otro lado, se analizan los niveles de distorsión armónico total (THD) y se comparan con los límites admisibles recomendados por reglamentaciones vigentes. En caso de superarse dichos niveles, se diseñan y dimensionan filtros para atenuar las magnitudes de THD. Un camino de baja impedancia creada por un filtro armónico de resonancia, reduce los armónicos de corriente de alimentación a la que el filtro está sintonizado (Currence, E. J., 1995).

## OBJETIVOS

Utilizando el subsistema “Chaco”, se modela una carga con polución armónica en la barra de media tensión (MT) de la estación transformadora ubicada en localidad de San Martín (ET SM). Se analizan los niveles de distorsión armónica total (THD) con y sin compensación reactiva. En caso de que dichos niveles se encuentren por encima de los admisibles, se diseñan filtros que mitiguen dichos efectos.

## METODOLOGÍA

Para el presente estudio se ha utilizado el modelo de red de la siguiente figura, en el cual puede apreciarse que se incluyen además de la red a la ET-SM bajo estudio, el resto de los corredores de 132 kV del subsistema de 500 kV “Chaco” y “Resistencia”.

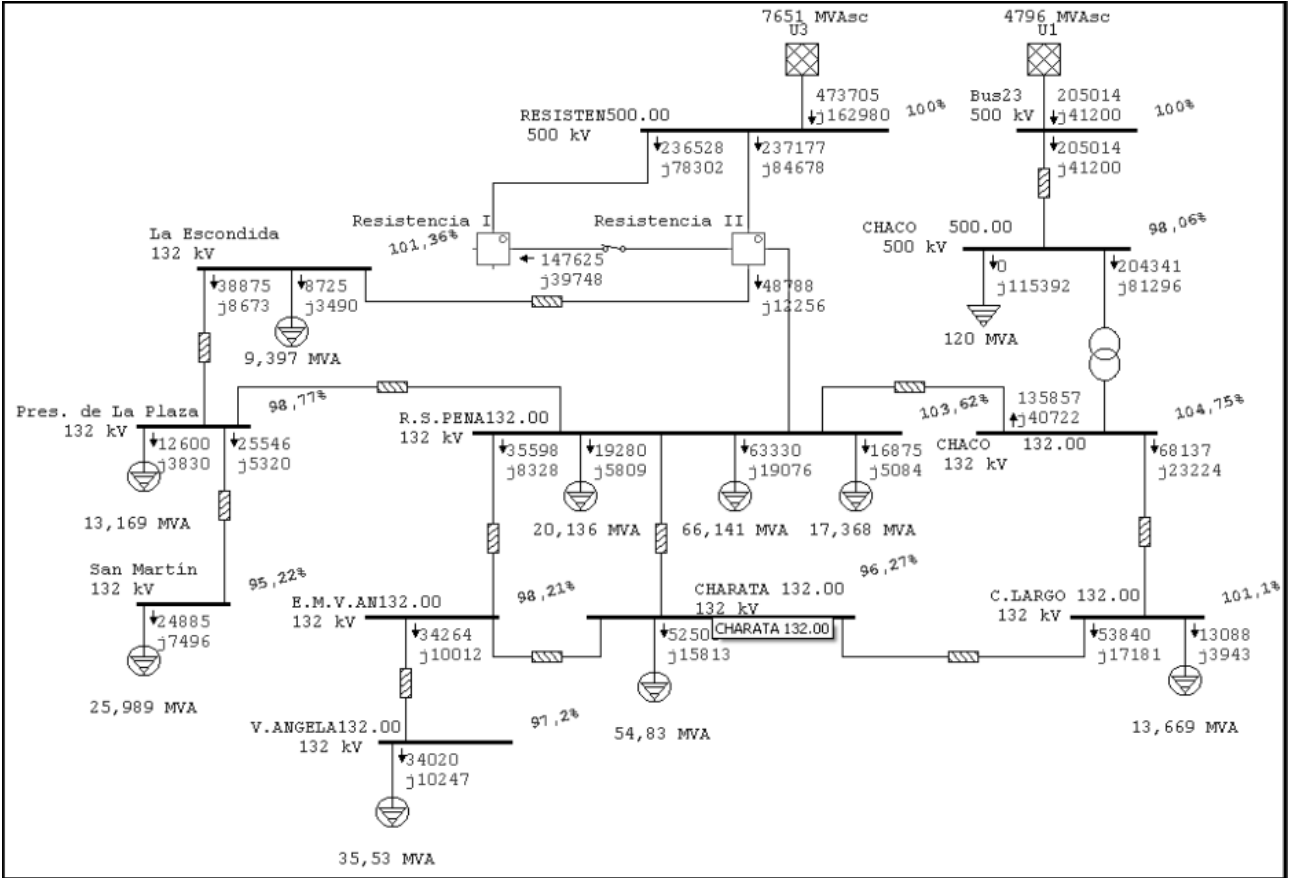


Fig. 1: Subsistema "Chaco".

## FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA ADOPTADA

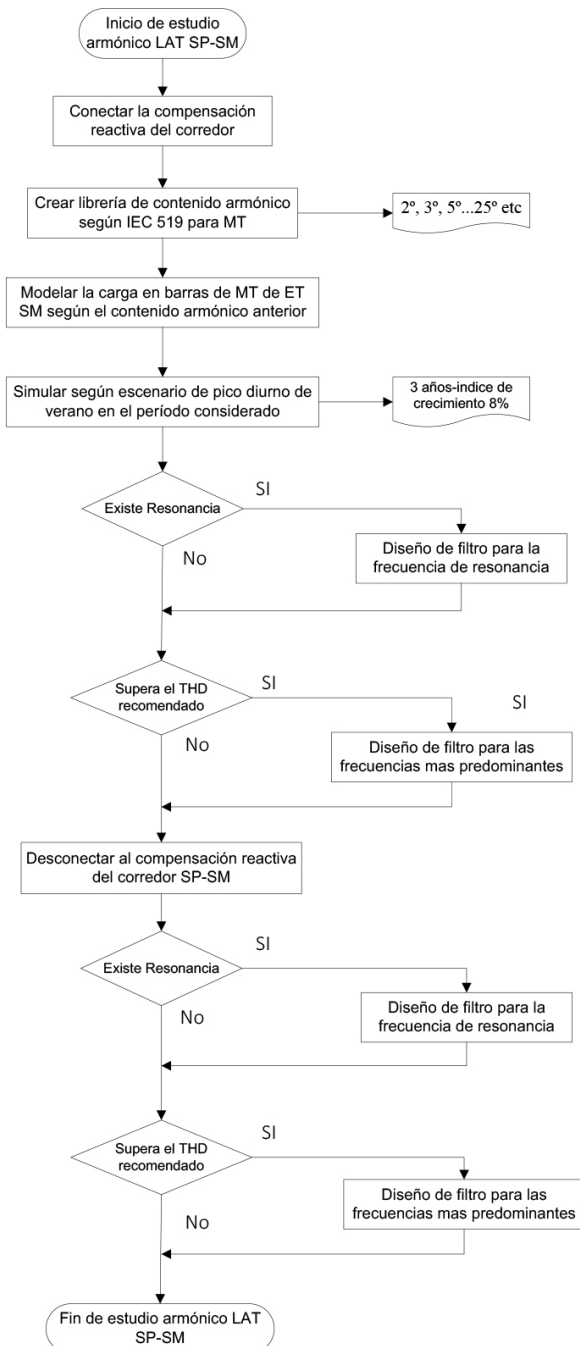


Fig. 2: Flujoograma de la metodología empleada.

## MODELADO DE LA CARGA ARMÓNICA

Para cuantificar la polución armónica en la red bajo estudio, ha de tenerse una aproximación del tamaño y tipo de carga en la red. Otra posibilidad es realizar un registro histórico de mediciones en diferentes puntos del sistema. Estas dos últimas alternativas pueden resultar algo dificultosas tanto por la demanda de tiempo requerida como por la disponibilidad de equipos de medición especiales. Ante esta situación, la metodología adoptada en el presente trabajo para fijar el contenido armónico en la red, ha sido aplicando los límites recomendados por la IEEE 519 ("Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems").

En la Figura 3 se muestra una imagen de la forma de onda de corriente que se obtiene, al aplicar las magnitudes anteriores en el modelado de la carga conectada en barras de MT en la ET SM.

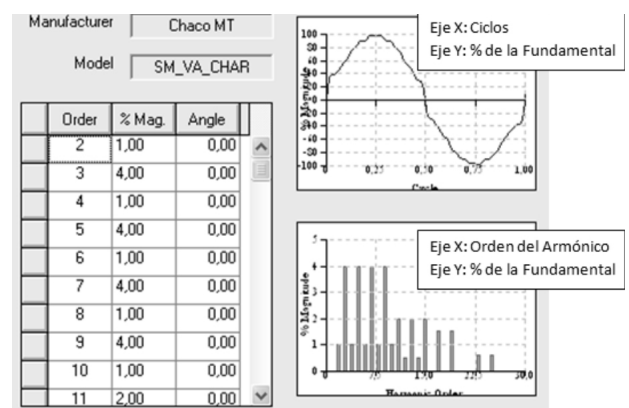


Fig. 3: Forma de onda de corriente y contenido armónico de la carga.

## LÍMITE ÁRMÓNICO EN LA RED Y EQUIPOS

Tal como se describió precedentemente, los armónicos bajo ciertas condiciones de funcionamiento de

la red, pueden provocar fenómenos de resonancia. Dicho fenómeno puede manifestarse de dos maneras, una es la resonancia paralela y la otra es la resonancia serie, cuya probabilidad de ocurrencia se incrementa considerablemente cuando existe la presencia de bancos de capacitores shunt.

Para la protección del banco de capacitores se toman en consideración las recomendaciones de la IEEE 18-2002 (“Standard for shunt power capacitors”) que especifica las exigencias de capacitores en régimen permanente (Tabla 1).

Variable	% del Valor Nominal
Q [kVAr]	135
U [kV]	110
I [A]	180
Upico [kV]	120

Tabla 1: Límites máximos recomendados en el punto de conexión de los bancos de capacitores.

Además se compara la distorsión armónica total obtenida (THD) con los límites admisibles en redes de media tensión según la IEEE 519 (Tabla 2).

Tensión [kV]	THD [%]
13,2	5
132	2,5

Tabla 2: Límites de THD para cada nivel de tensión.

A partir de las magnitudes anteriormente establecidas, es posible monitorear que los parámetros del sistema no superen los máximos establecidos en barras y equipos ante la presencia de cargas con polución armónica.

ESTUDIO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Primeramente se realiza un análisis de barrido en frecuencia del sistema, con la compensación y sin la compensación reactiva. Esta herramienta permite detectar cual es el orden armónico que puede provocar resonancia paralela o serie. Además es posible observar la incidencia de la compensación reactiva en la modificación de la frecuencia de resonancia (Figura 4 y Figura 5).

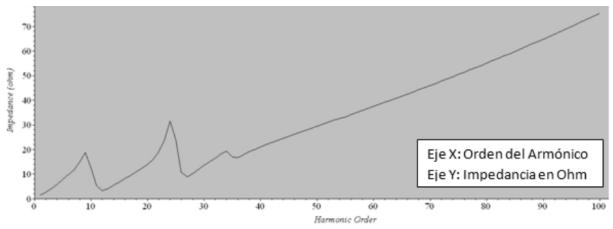


Fig. 4: Respuesta en frecuencia barra MT en ET SM sin compensación.

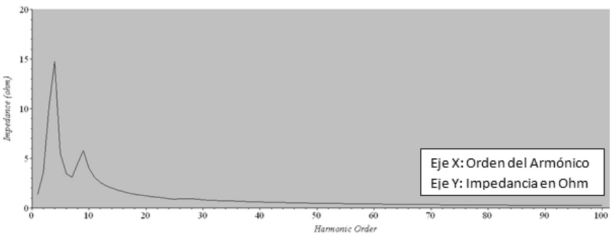


Fig. 5: Respuesta en frecuencia barra MT en ET SM con compensación.

En las imágenes anteriores se observa, que la presencia de la compensación reactiva provoca que la frecuencia de la resonancia paralela tienda a acercarse a la fundamental. Esto hace suponer que si existe polución armónica de baja frecuencia en la barra de MT de SM en un nivel considerable, es probable que se generen fenómenos de resonancia y consecuentes sobretensiones.

También pueden provocar daños por sobrecarga en los capacitores conectados en el punto de acople común (PCC). Por lo tanto la presencia de capacitores aumenta

la probabilidad de resonancia para frecuencias más cercanas a la fundamental, las cuales suelen ser las más predominantes en redes de potencia. Como contrapartida, disminuye los niveles de impedancia a partir del 10º orden aproximadamente.

## DISEÑO DE FILTROS

En función de lo estudiado y analizado hasta aquí, es posible vislumbrar que en el sistema SM la desconexión de la compensación empeora las condiciones ante la presencia de una carga de tales características incrementando los niveles de THD.

Por dicho motivo, en este apartado se implementan herramientas para disminuir los niveles de THD y poder cumplir con los requerimientos calidad de energía y producto técnico mediante la implementación de filtros. Para esta situación en particular, se ha implementado el denominado “Shunt Resonante”. El mismo está constituido por una rama L-C serie, cuya frecuencia de sintonización se obtiene a partir de la ecuación 1.

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

Para lograr la mayor efectividad posible, se sintoniza fr en aquellos órdenes de armónicos que provocan un mayor aporte al nivel de THD.

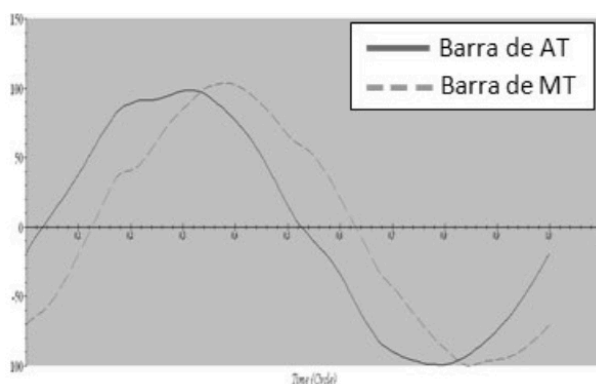


Fig. 6: Forma de onda con compensación en barra de AT y MT.

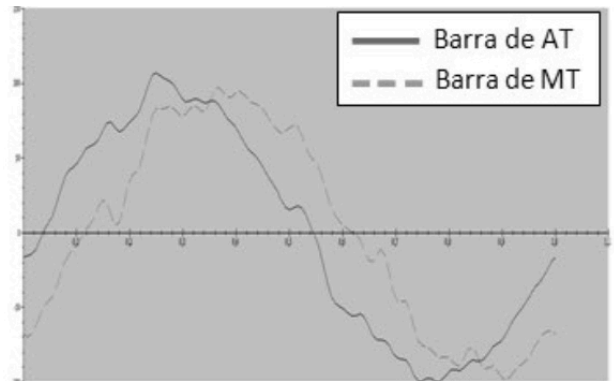


Fig. 7: Forma de onda sin compensación.

Para el escenario en que existe compensación reactiva, se observa que los armónicos más dominantes y en orden de importancia son el 5º, 7º y 11º. Por otro lado para el escenario en que no existe compensación reactiva resultan ser el 7º, 5º y 11º, con la salvedad de que los niveles en este último caso se incrementan de manera considerable. Los efectos armónicos causados en uno y otro caso pueden ser apreciados observando las formas de ondas correspondientes (Figura 6 y Figura 7).

A partir del análisis anterior, se dimensionan los filtros suponiendo un escenario con compensación reactiva (obtenida en estudios preliminares), esto es para la máxima demanda que corresponde al tercer año de análisis (carga pico de verano 2019). Luego se realiza la simulación sin la compensación reactiva que corresponde al primer año de análisis, cuando no es necesaria la compensación (carga pico de verano en 2016).

## RESULTADOS

Es posible apreciar la efectividad de los filtros ya que se han logrado corregir los niveles de THD a magnitudes por debajo de los límites recomendados para redes de media y alta tensión.

Para el sistema con compensación reactiva conectada, solo ha sido necesario la conexión de dos filtros resonantes en la 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> armónica. En el caso del sistema sin compensación, han sido necesarios tres filtros resonantes en la 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> y 11<sup>a</sup> armónica. Por otro lado, la efectividad de los filtros en la sintonización y mitigación en su frecuencia homónima, puede ser comprobada mediante un análisis espectral y observando el mejoramiento de la forma de onda de tensión, tal como muestran las imágenes siguientes (Figura 8 y Figura 9).

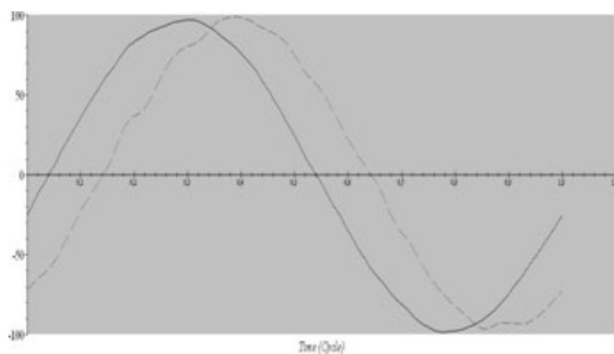


Fig. 8: Forma de onda con compensación y con filtros para la 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> armónica.

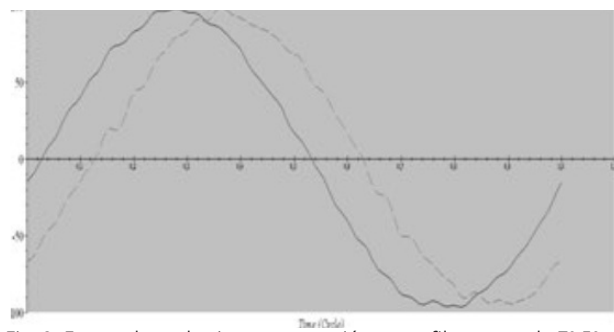


Fig. 9: Forma de onda sin compensación y con filtros para la 7<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> y 11<sup>a</sup> armónica.

## CONCLUSIONES

Cuando existe una carga con inyección armónica como la modelada según IEEE 519, se verifica que la presencia de los bancos provoca una atenuación del THD. De todas formas siempre es necesario verificar que la presencia de estos, no provoque fenómenos de resonancia debido al acercamiento de la frecuencia de resonancia a la fundamental.

Para este estudio en particular, la implementación de filtros tipo “Shunt Resonante” ha demostrado cumplir con las expectativas deseadas, ya que han podido reducir a una magnitud despreciable las componentes armónicas más predominantes.

Finalmente se ha podido determinar que para el caso en que existe compensación reactiva se necesita un filtro menos que cuando no existe compensación reactiva. Esto se debe al efecto mitigador que incorpora al sistema la compensación reactiva en los niveles de THD.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Ulises Manassero y al Ing. Andrés Zottico por el impulso, la orientación y el tiempo dedicado en nosotros durante la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Anwar, S., Elrayyah A., Sozer, Y. (2015). "Efficient Single-Phase Harmonics Elimination Method for Microgrid Operations," (págs. 3394-3403). IEEE Transactions on Industry Applications.

Lemieux, G. (1990). "Power System Harmonic Resonance - A Documented Case" (págs. 483-488). IEEE Transactions on Industry Applications.

Currence, E. J., Plizga, J. E., Nelson, H. N. (1995). "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant," (págs. 682-690). IEEE Transactions on Industry Applications.

Huang, Z., Xu, W., Dinavahi, V. R. (2003). "A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications" (págs. 1-6). IEEE. Transactions on power delivery.

Czarnecki, L. S., Gin, H. (2000). "Effectiveness of resonant harmonic filters and its improvement," Power Engineering Society Summer Meeting (742-747). Seattle, WA. IEEE.

Currence, E. J., Plizga J. E. and Nelson, H. N., (1995). "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant," (págs. 682-690). IEEE. Transactions on Industry Applications.